

Collectors // Solar Energy. – Serial No. 94. – August 2013. – pp. 145–154.

7. *Rassamakin B., Khairnasov S., Musiy R., Alforova O., Rassamakin A.* Solar Collector Based on Heat Pipes for Building Facades. Proceedings of the 4th International Conference in Sustainability in Energy and Buildings. Hakansson, A.; Höjer, M.; Howlett, R.J.; Jain, L.C. (Eds.). Series: Smart Innovation, Systems and Technologies, Berlin: Springer; Vol. 22, 2013, XXVI, pp. 119–126.

8. *QAIST D2 3 Guide to EN 12975 / A guide to the standard EN 12975 – ESTIF*

[http://www.estif.org/projects/completed\\_projects/qaist/project\\_summary/wp2\\_solar\\_thermal\\_collectors/](http://www.estif.org/projects/completed_projects/qaist/project_summary/wp2_solar_thermal_collectors/)

9. *DIN CERTCO.* Summary of Collector Testing for Vitosol 100-F Typ SV1. Registration No 011-7S329-F, October 2007.

10. *Engineering VITOSOL 100, 200, 300,* Viessmann #5829 135-8 GUS 4/2006.

11. *Khairnasov S., Rassamakin B., Musiy R., Rassamakin A.* Solar Collectors of Buildings Facade Based on Aluminum Heat Pipes with Colored Coating. Journal of Civil Engineering and Architecture, Volume 7, No. 5 (Serial No. 66), May. 2013. – P. 403–409.

УДК 621.383:621.472

**А.В.Макаров**, канд.фіз.-мат.наук, **В.О.Ганус**, **В.М.Дикуша** (Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України, Київ), **В.І.Горбулик**, канд.техн.наук (Чернівецький факультет НТУ "ХП", Чернівці)

## Синхронізована фасеточна система інсталяції сонячних модулів

*Розроблено та досліджено двохосову фасеточну синхронізовану слідкуючу систему для інсталяції сонячних модулів. Запропонована слідкуюча система зручна для застосування в умовах щільної міської забудови для розміщення на горизонтальних та вертикальних поверхнях дахів та стін висотних будинків. Представлені експериментальні характеристики макетного зразка запропонованої слідкуючої системи.*

*Разработана и исследована двухосевая фасеточная синхронизированная следящая система для инсталляции солнечных модулей. Предложенная следящая система удобна для применения в условиях плотной городской застройки для размещения на горизонтальных и вертикальных поверхностях крыши и стен высотных зданий. Представлены экспериментальные характеристики макетного образца предложенной следящей системы.*

**Вступ.** Внаслідок дорожчання енергії від традиційних вуглеводневих та ядерних джерел, а також постійного зниження цін на енергію від нетрадиційних відновлюваних джерел має місце зближення значень їх вартості. Експерти прогнозують, що "вирівнювання" цін на електроенергію від традиційних та альтернативних джерел можна чекати уже в 20-30-х роках нинішнього сторіччя, після чого роль альтернативної енергетики значно зросте, і вона отримає статус одного з головних факторів забезпечення життєдіяльності людської цивілізації. Одним із таких альтернативних відновлюваних джерел електроенергії є фотовольтаїчні сонячні електростанції (далі СЕС) [1–5].

**Розміщення фотовольтаїчних електростанцій.** Розрізняють два підходи до практичного застосування СЕС: централізоване та децентралізоване їх розміщення. Прийнято вважати, що важливою перевагою фотовольтаїчних СЕС є можливість їх децентралізованого розміщення безпосередньо на енергоспоживаючому об'єкті. Завдяки цьому "сонячні" джерела електроенергії мають переваги по надійності, оскільки не уразливі з боку аварій або дій терористів, на відміну від таких енергогенеруючих об'єктів, як потужні атомні чи гідроелектростанції. Крім того, в разі децентралізованого використання СЕС, непотрібно витрачати кошти на прокладку та обслуговування ліній

електропередач.

З роками думка розробників та експлуатаційників змінилась, оскільки збільшилися масштаби застосування СЕС. Експерти дійшли до висновку, що великі СЕС зручно розміщувати компактно за межами міст у сонячній, захищеній від вітру місцевості, а отриману електроенергію лініями електропередач передавати споживачам. Зазвичай, централізована СЕС обслуговує потреби в електроенергії невеликого міста. На рис. 1 наведено фото однієї з найбільших у світі СЕС встановленою потужністю 100 МВт, нещодавно побудованої поблизу с. Перове (Крим, Україна). Загальна встановлена потужність СЕС, побудованих на півдні України протягом останніх декількох років, на сьогоднішній день досягла 187,5 МВт (Родникове, Охотникове, Перове) [6].



Рис. 1. Одна з найбільших у світі СЕС "Перове" встановленою потужністю 100 МВт побудована поблизу м. Сімферополь (Крим, Україна) [6].

Разом з тим залишився і децентралізований підхід до застосування СЕС, коли сонячні модулі (СМ) розміщуються безпосередньо поблизу споживача, наприклад, на дахах будівель або на їх стінах, за умови їх орієнтації на Сонце в напрямку екватора. Прикладом такої інсталяції СМ може бути СЕС Корейського інституту енергетичних досліджень у м. Денжюон (Південна Корея), фото якої представлено на рис. 2.

**Двохосьова екліптично-азимутальна фасеточна синхронізована система інсталяції сонячних модулів.** Зниження вартості "сонячної" електроенергії є одним із головних завдань сучасної

фотовольтаїчної енергетики. Для вирішення цієї задачі необхідно, перш за все, мінімізувати втрати під час прийому та перетворення променистої енергії Сонця в електричну енергію. Необхідною умовою зниження втрат при прийманні сонячної енергії є забезпечення умов перпендикулярного падіння сонячних променів до площини фотовольтаїчного СМ або сонячного теплового колектора. Навіть невелике відхилення від цих умов призводить до суттєвих втрат, які прийнято називати втратами косинусів (cosine loss) [6].



Рис. 2. Стационарно встановлені СМ на південній стіні однієї з будівель Корейського інституту енергетичних досліджень (м. Денжюон, Південна Корея).

Застосування СЕС в умовах щільної міської забудови має свої особливості. Типовим прикладом такого урбаністичного рельєфу є забудова центральної частини м. Нью-Йорк (США), представлена на рис. 3. З рисунка видно, що в цьому випадку має місце проблема дефіциту місця на горизонтальних ділянках, які освітлюються Сонцем протягом дня без затінення. В той же час вертикальні поверхні стін висотних будівель, які домінують по висоті у міському рельєфі місцевості, за умови їх відповідної орієнтації та при сонячній погоді будуть добре освітлені Сонцем. Тому актуальною і корисною задачею є розробка конструкції опорно-поворотної системи, яку можна розміщувати не тільки на плоских відкритих дахах будівель, але й на вертикальних стінах.

Такою системою, на нашу думку, є двухосьова екліптично-азимутальна синхронізована фасеточна система (далі Система) інсталяції СМ. Принцип дії екліптично-азимутальної двухосьової системи

слідкування за Сонцем пояснюють рисунки 4 та 5. З рисунків видно, що в цьому випадку контрольоване обертання СМ відбувається навколо азимутальної осі (рівномірне обертання зі швидкістю обертання Землі, тобто один оберт на добу, або  $15^\circ/\text{год}$ ) та навколо осі схилень (на кут  $\pm 23,6^\circ$  протягом року, яке характеризує річний рух Землі відносно Сонця). Саме з цієї причини ця система має переваги перед поширеною альт-азимутальною системою слідкування за Сонцем [7–9].



Рис. 3. Забудова центральної частини м. Нью-Йорк, США.

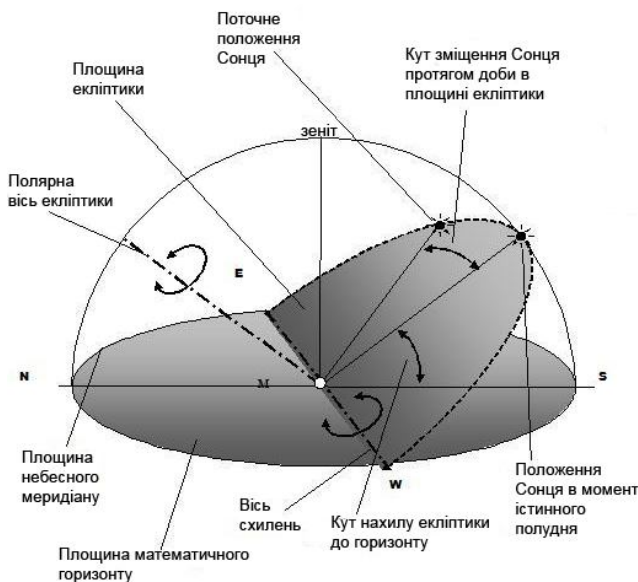


Рис. 4. Орієнтація осей двохосьової екліптично-азимутальної системи слідкування за Сонцем.

Фасеточний принцип побудови такої слідуючої системи інсталяції СМ дозволяє мінімізувати площу, яка потрібна для її встановлення, а також дозволяє робити її досить вузькою. Остання обставина важлива при встановленні слідуючих систем

на вертикальних стінах будинків, оскільки полегшує умови боротьби з вітровими навантаженнями.

На рис. 6 показано, як виглядає двохосьова екліптично-азимутальна фасеточна синхронізована система з чотирьох СМ та пояснюється, як вона кріпиться до вертикальних та горизонтальних поверхонь. З рисунка видно, що система містить одну вісь схилень, декілька (по числу фасет) азимутальних осей та механічний синхронізатор, більш детально показаний на рис. 7. На рис. 8 показано розміщення Системи на стінах та дахах будинків.

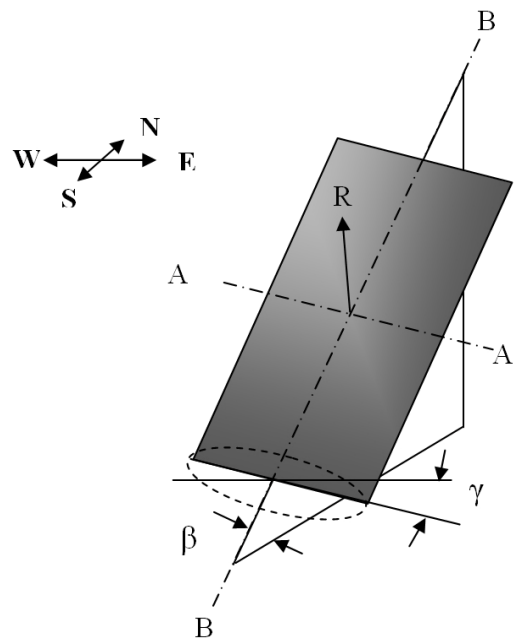


Рис. 5. Схема орієнтування СМ на Сонце в двохосьовій екліптично-азимутальній опорно-поворотній системі:  $AA$  – вісь схилень;  $BB$  – вісь азимутів;  $\gamma$  – азимутальний кут у площині екліптики;  $\beta$  – кут нахилу осі схилень ( $\beta = \varphi - \delta$ );  $R$  – перпендикуляр до площини СМ.

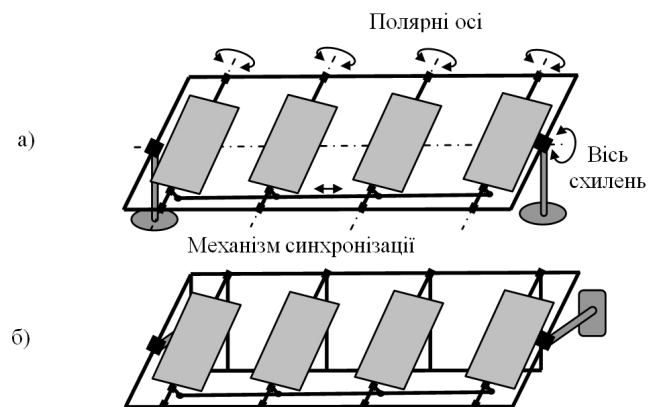


Рис. 6. Двохосьова екліптично-азимутальна фасеточна синхронізована система інсталяції СМ: а) кріплення до горизонтальної поверхні; б) кріплення до вертикальної поверхні.

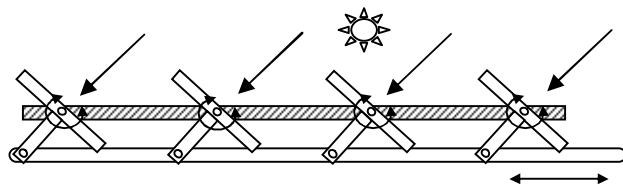


Рис. 7. Принцип механічної синхронізації повороту СМ у складі Системи.

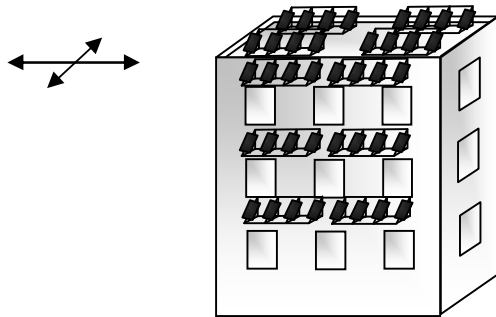


Рис. 8. Інсталяція Системи на стінах та дахах висотного будинку.

Тривалість роботи визначається мінімальним кутом до горизонту, при якому настає взаємне затінення фасет  $\alpha_k$ , і залежить від ширини фасет та відстані між ними. З рис. 9 можна бачити, що значення критичного кута затінення визначається виразом:

$$\alpha_k = \arcsin D(D+L), \quad (1)$$

де  $\alpha_k$  – кут затінення;  $D$  – ширина СМ;  $L$  – відстань між СМ.

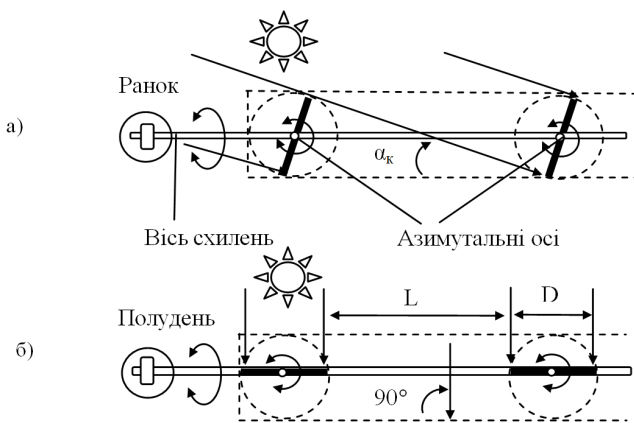


Рис. 9. Схема проєкції на площину екліптики Системи: а) ранок; б) полудень;  $\alpha_k$  – кут затінення;  $D$  – ширина СМ;  $L$  – ширина проміжку між СМ.

Для зручності виберемо  $L$  кратним  $D$ , тобто  $L = n \cdot D$ , де  $n$  – ціле натуральне число. За формулою (1) розрахуємо  $\alpha_k$  для випадку  $D=L=0,5$  м для значень  $n$  від 1 до 5. Для умови точної орієн-

тації СМ на південь у момент полудня визначимо орієнтовний час початку ранкового та вечірнього затінення по сонячному часу. Результати розрахунків представлені в таблиці 1. З таблиці видно, що зі збільшенням відстані між модулями  $L$  кут  $\alpha_k$  зменшується.

Таблиця 1. Залежність  $\alpha_k$  від  $L$  для випадку  $D=L=0,5$  м

$D, \text{ м}$	$n$	$L, \text{ м}$	$\alpha_k, \text{ град.}$	Ранок	Вечір
0,5	1	0,5	30,0	8.00	16.00
0,5	2	1,0	19,5	7.20	16.40
0,5	3	1,5	14,5	7.00	17.00
0,5	4	2,0	11,5	6.40	18.40

Для експериментального дослідження Системи було виготовлено та досліджено макетний зразок, фото якого представлено на рис. 10. До складу макетного зразка входять чотири робочі площадки для СМ, які можуть обертатися навколо осі схилень і відповідних азимутальних осей, та механізм синхронізації. Протягом безхмарних сонячних днів у середині червня 2012 року було проведено серію експериментів із вимірювання часових залежностей струму короткого замикання  $I_{k3}$  протягом світлового дня для СМ, встановлених на робочих площадках макетного зразка Системи; для СМ, встановлених стаціонарно, орієнтованих на південь і нахилених під кутом широти місцевості; для СМ, інсталюваних у горизонтальній площині.

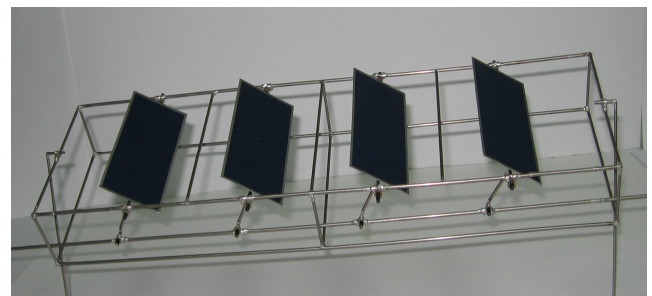
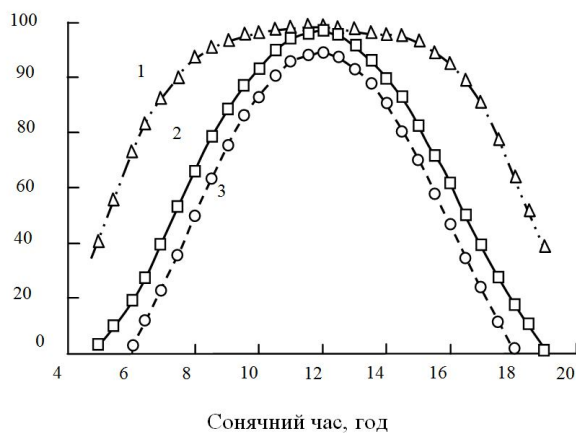


Рис. 10. Фото макетного зразка Системи з чотирьох СМ.

Експериментально отримані залежності  $I_{k3}/I_{k3 \max}$  ( $I_{k3 \max}$  – максимальне значення  $I_{k3}$ ) від часу дня представлені на рис. 11 для СМ у складі синхронізованої фасеточної системи інсталяції (1), стаціонарно встановлених орієнтованих на південь СМ (2) та СМ, інсталюваних у горизонтальній площині (3). З рисунка видно, що енерговіддача СМ, встановлених у двохосьовій фасеточній слідкуючій системі, значно перевищує енерговіддачу СМ, встановлених стаціонарно. Обрахунки отриманих

даних показали, що енерговіддача СМ, орієнтованих на південь та нахилених до горизонту під кутом географічної широти місцевості (в даному випадку на широті Києва – 50,2° північної широти) збільшує їх енерговіддачу на 21%, а інсталяція їх у двохосьову фасеточну систему збільшує енерговіддачу на 84%. Якщо ж порівнювати денну енерговіддачу СМ, орієнтованих на південь і стаціонарно закріплених під кутом широти місцевості, з енерговіддачею СМ аналогічної площі, встановлених у двохосьовій фасеточній слідкуючій системі, то остання буде на 52% вищою.

$I_{кз}/I_{кз\max}$ , В. О.



**Рис. 11. Залежності  $I_{кз}/I_{кз\max}$  для СМ Системи (1); стаціонарно встановленої орієнтованої на південь СМ (2); встановленої горизонтально (3).**

Слід зазначити, що частина додатково отриманої енергії буде використана на живлення електроприводу системи орієнтації, але навіть із врахуванням цієї обставини, як свідчать літературні дані [10–12], денний вигравш в енерговіддачі складає 25-35%.

**Висновки.**

- При децентралізованому застосуванні СМ в умовах щільної міської забудови доцільно використовувати відкриті для сонячного випромінювання горизонтальні та вертикальні поверхні дахів і стін будинків.
- В міських умовах є проблема дефіциту місця для інсталяції сонячних модулів та звичайних слідкуючих систем на горизонтальних ділянках поверхні.
- Для досягнення максимальної ефективності сонячної електростанції необхідно застосовувати двохосьові слідкуючі за Сонцем системи.

увати двохосьові слідкуючі за Сонцем системи.

- Розроблено оригінальну двохосьову екліптично-азимутальну фасеточну синхронізовану систему інсталяції сонячних модулів, зручну для застосування в урбаністичних умовах на вертикальних поверхнях фасадів будинків та горизонтальних поверхнях їх дахів.
- Виготовлений та досліджений макетний зразок розробленої системи показав, що енерговіддача СМ у її складі перевищує енерговіддачу стаціонарно встановлених СМ на місцевості більш ніж у півтора рази.

1. Мхитарян Н.М., Мачулін В.Ф. Проблемы развития энергетики Украины. Возобновляемая и нетрадиционная энергетика // Наука та інновації. – 2006. – Т.2. – Вип. 2. – С. 63–75.
2. Наумов А.В. Производство фотоэлектрических преобразователей и рынок кремниевого сырья в 2006-2010 гг. // Технология конструирования в электронной аппаратуре. – 2006. – №4. – С. 3–8.
3. Мачулін В.Ф., Литовченко В.Г., Стрїха М.В. Сонячна енергетика: порядок денний для світу й України // Вісник НАН України. – 2011. – №5. – С. 30–39.
4. Патон Б.С., Ключ М.І., Коротинський О.С., Макаров А.В., Трубицин Ю.О. Умови ефективного застосування сонячних електроенергетичних систем // Вісник НАН України – 2012. – № 3. – С.48–58.
5. Оксанич А.П., Тербан В.А., Волохов С.О., Ключ М.І., Скришевський В.А., Макаров А.В., Костильов В.П. Сучасні технології виробництва кремнію та кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії. – Монографія. – Кривий Ріг. – Мінерал. – 2010. – 267 с.
6. Самые большие солнечные электростанции мира. <http://meditation-portal.com/desyat-samykh-bolshikh-solnechnykh-ehlektrostantsij-mira>
7. William B. Stine, Michael Geyer. Power From The Sun by William B. Stine and Michael Geyer – 2001. – <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter04.html>
8. Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. – John Wiley&Sons – 2003. – 1179 p.
9. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика: Учебное пособие для вузов – Под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2008. – 317 с.
10. Rooftop Solar Tracker Technical Features. – <http://sun-tracker-optimtop.com/Features.aspx>
11. Catarius A., Christiner M. Azimuth-Altitude Dual Axis Solar Tracker. – December 16, 2010 – [http://wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-121710-140419/unrestricted//Dual\\_Axis\\_Tracker\\_Final\\_Report.pdf](http://wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-121710-140419/unrestricted//Dual_Axis_Tracker_Final_Report.pdf)
12. Focus on Solar Tracking. – <http://solar-tracking.com>